

С. С. МИХАЙКОВ, М. Й. МУХА, А. О. ДРАНКОВА

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМАХ СУДОВОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ

У роботі приведений варіант підвищення якісних показників електроенергії суднової електромережі хімовозу в експлуатаційних режимах системи охолодження дизель-генераторів, що включає частотно-регульовані електроприводи насосів, шляхом застосування пасивних С-фільтрів. Оцінка таких показників якості електроенергії як коефіцієнтів гармонік і сумарних коефіцієнтів гармонік за напругою та струмом суднової електромережі при типових режимах роботи системи охолодження проведена на розробленій у середовищі MATLAB Simulink моделі «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів».

Ключові слова: показники якості електроенергії, частотний перетворювач, асинхронний двигун, контур охолодження дизель-генераторів, осцилограми напруги та струму, сумарний коефіцієнт гармонік (THD).

С. С. МИХАЙКОВ, Н. И. МУХА, А. О. ДРАНКОВА

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМАХ СУДОВОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

В работе приведен вариант повышения качественных показателей электроэнергии судовой электросети химовоза в эксплуатационных режимах системы охлаждения дизель-генераторов, включающую частотно-управляемые электроприводы насосов, путём применения пассивных С-фильтров. Оценка таких показателей качества электроэнергии как коэффициентов гармоник и суммарных коэффициентов гармоник по напряжению и току судовой электросети при типичных режимах работы системы охлаждения проведена на разработанной в среде MATLAB Simulink модели «Судовая электросеть - система охлаждения дизель-генераторов».

Ключевые слова: показатели качества электроэнергии, частотный преобразователь, асинхронный двигатель, контур охлаждения дизель-генераторов, осциллограммы напряжения и тока, суммарный коэффициент гармоник (THD).

S. MIKHAYKOV, M. MUKHA, A. DRANKOVA

IMPROVING THE ELECTRIC ENERGY QUALITY IN OPERATION MODES OF SHIP'S COOLING SYSTEM

The paper presents a variant of improving the power quality parameters of the ship's power supply network of a chemical tanker in the operating modes of the diesel generators cooling system, which fitted frequency-controlled electric drives of pumps, by using passive C-filters. The assessment of such power quality parameters as harmonic coefficients and total harmonic coefficients for the voltage and current of the ship's electrical network under typical operating conditions of the cooling system was carried out on the model "Ship's electrical network - diesel generator cooling system" developed in MATLAB Simulink. A generalized parameter of the quality of the ship's power grid, namely THD was obtained for all typical operation modes of a pump electric drives using a C-type filter. The paper gives recommendations on the use of C-type filters to improve the quality of the chemical tanker autonomous power network for the diesel generators cooling system.

Keywords: electricity quality parameters, frequency converter, asynchronous motor, cooling system, oscillogram of voltage and current, total harmonic distortion (THD).

Введення. Питання якості електроенергії на борту суден є надзвичайно важливим, зокрема, в даний час, коли очевидний значний прогрес в реалізації сучасних частотно-регульованих електроприводів для суднових механізмів і комплексів. Суднові енергосистеми є ізольованими енергосистемами. Характеристиками цих систем: недостатнє в деяких випадках співвідношення потужності одного споживача до потужності електричного джерела (деякі потужності споживача часто можна порівняти з потужністю генератора, що живить їх) [1] і відносно високий імпеданс короткого замикання генераторів, встановлених в розглянутих системах. В роботі виконаний аналіз якості електроенергії суднової електромережі на прикладі танкера – хімовозу з електроенергетичною установкою, яка складається із чотирьох дизель-генераторів – Wartsila 3 × DG: 6,6 kV 3,0 MW та 1 × DG: 6,6 kV 2,2 MW, та електричної пропульсивної установки з потужністю гребного електродвигуна 10MW 1,2kV.

В якості об'єкту дослідження розглядається один з контурів системи охолодження дизель-генераторів, а саме контур заборотної води. Дана система є частиною

загальної системи охолодження судна, яка охолоджує контур прісної води заборотною морською водою, за допомогою теплообміну між ними, у теплообмінних холодильних апаратах. Система заборотної води включає три відцентрові насоси з приводними асинхронними електродвигунами, потужністю 48,5 кВт кожний. Система живлення і управління електродвигунами реалізована на базі частотних перетворювачів фірми Danfoss типу VLT AQUA Drive серії FC202, забезпечує оптимальні режимні параметри приводних двигунів дизель-генераторів.

Система охолодження судна працює у двох режимах: навігаційному та стоянковому. У залежності від цих режимів роботи та енергетичних показників стану працюючих дизелів генераторів змінюється частота обертів електродвигунів та контролюється положення трипозиційних клапанів. Управління електродвигунами здійснюється програмно за принципом «Master - Slave». Система управління забезпечує одночасну роботу одного-двох електродвигунів, третій – знаходиться у резерві.

На рис. 1 зображена блок-схема системи охолодження контуром забортної води дизель-генераторів з використанням частотних перетворювачів типу VLT AQUA Drive FC202-P55K на 55 кВт фірми Danfoss:

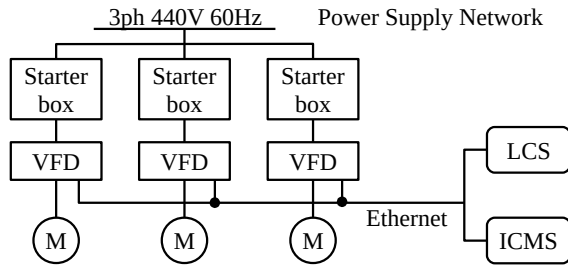


Рис. 1. Блок-схема системи охолодження контуром забортної води

Power supply network – 3phase/440VAC/60 Hz;
 Starter Box – Electromagnetic commutating equipment;
 VFD – Variable Frequency Drive; LCS – Local Control System;
 ICMS – Integrated Control and Management System; Ethernet – Communication method; M – Asynchronous electric motor.

Мета дослідження. Оцінка показників якості електроенергії суднової електромережі на комп'ютерній моделі «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів» при використанні С-фільтрації у типових режимах експлуатації.

Методи дослідження. Для аналізу показників якості електроенергії суднової електромережі була створена комп'ютерна модель «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів» у пакеті MATLAB Simulink 16b (рис.2) [2]. До складу комп'ютерної моделі входять наступні блоки:

- трифазне джерело електроживлення з напругою 440 В та частотою 60 Гц;
- трифазний блок індуктивностей для задання параметру індуктивності мережі $L = 2$ мГн;
- два асинхронних двигуна потужністю 48,5 кВт з перетворювачами частоти;
- блоки задання насосного характеру навантаження;
- блок пасивної фільтрації;
- блок вимірювання імпедансу;
- блоки вимірювання та візуалізації процесів.

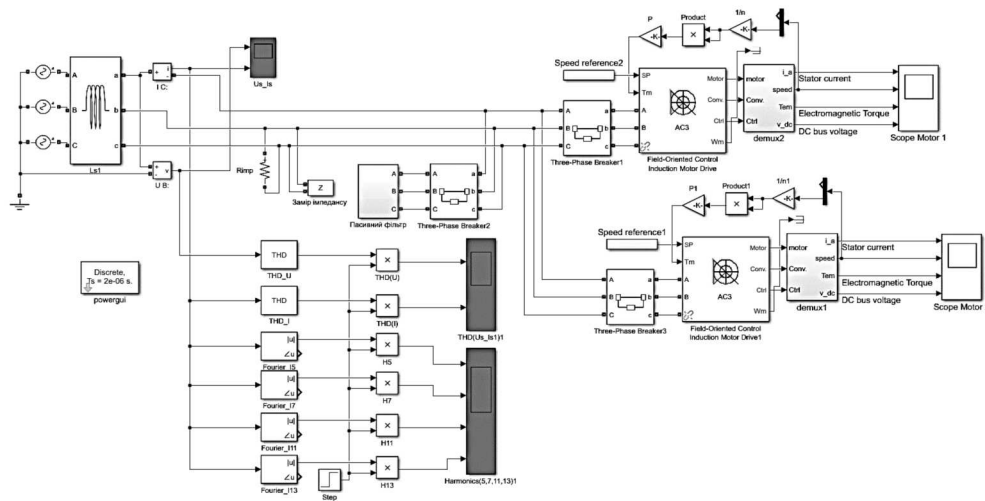


Рис. 2. Комп'ютерна модель «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів»

Результати моделювання. В процесі моделювання були отримані наступні миттєві характеристики електромеханічної системи «частотний перетворювач – асинхронний двигун – навантаження», а саме струм статора, оберти ротора, електромагнітний момент та напруга ланки постійного струму обох електродвигунів з частотним управлінням при налаштуванні моделі на характерні режими роботи системи охолодження дизель-генераторів (рис.3). Аналіз миттєвих характеристик показав адекватність комп'ютерної моделі «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів» реалізовувати типові режими роботи електромеханічної системи [3].

В процесі моделювання контуру забортної води на номінальних обертах асинхронних двигунів (близько 3000 об/хв) отриманні осцилограми напруги (зверху) та струму (знизу) суднової електромережі (рис. 4), що підтверджують наявність гармонійних спотворень. Так, сумарний коефіцієнт гармонік по напрузі THDU перевищує 7%, що не відповідає вимогам морських Класифікаційних Товариств до якості суднової електромережі [4]. Якісний аналіз показав, що найбільш вагомими є 5, 7, 11 та 13 гармоніки електромережі.

Для підвищення якості електроенергії суднової електромережі пропонується використання пасивного фільтра С-типу для 5-ї, 7-ї, 11-ї, 13-ї гармонік [5,6]. Принципова електрична схема пасивного фільтра С-типу наведена на рис. 5. Розрахунок фільтра проведено з урахуванням наступних параметрів електромережі та фільтра: напруга електромережі $U = 440$ В; частота електромережі $f = 60$ Гц; індуктивність електромережі $L_s = 2$ мГн; реактивна потужність фільтра $Q_F = 37$ кВар; коефіцієнт розподілення гармонік $k = 1,3$; кратність гармонік $n_g = 5,7,11,13$.

Використання пасивного фільтра С-типу у комп'ютерній моделі «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів» дозволила отримати наступні осцилограми напруги та струму суднової електромережі (рис. 6).

Як видно з осцилограм, їх форма стала більш синусоїдальною за рахунок зменшення кількості гармонійних спотворень.

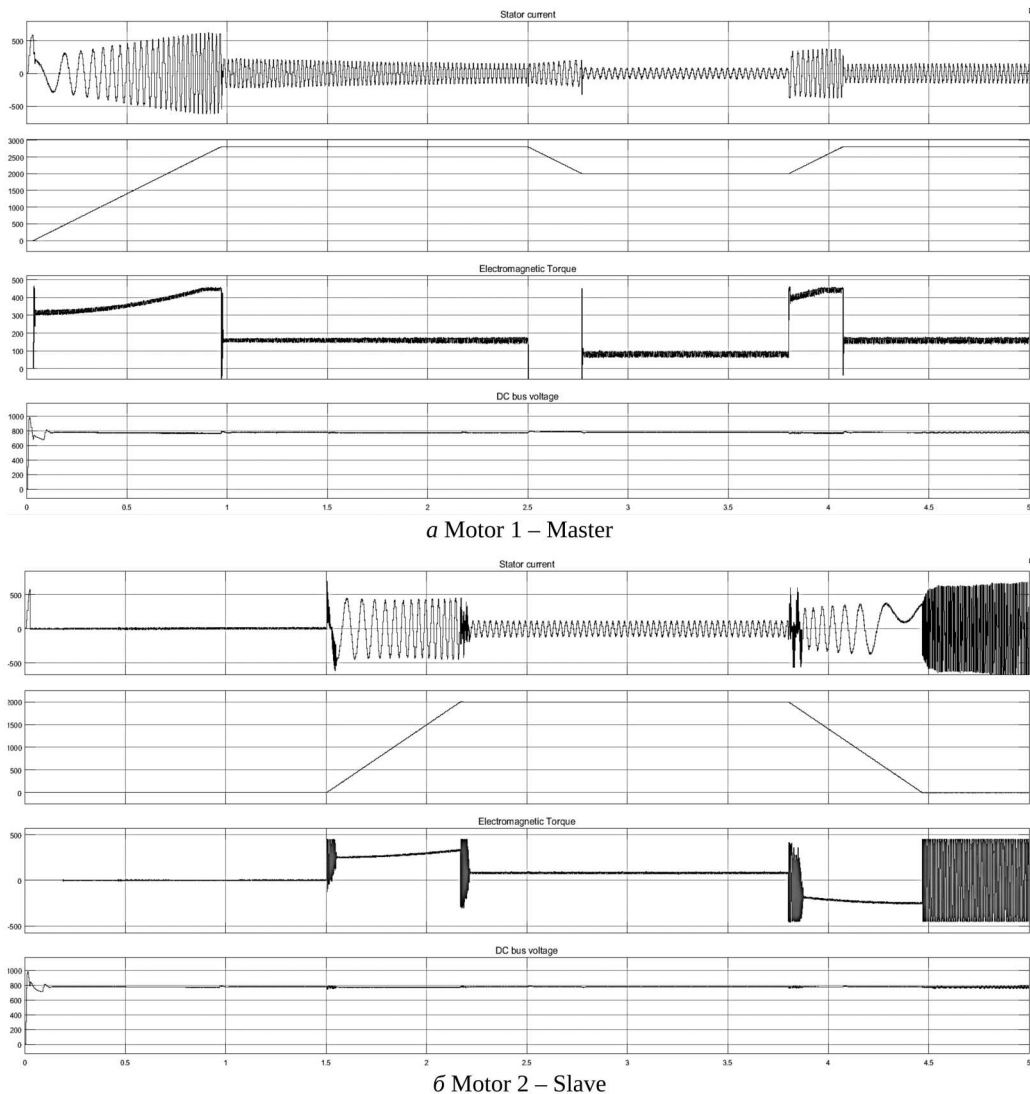


Рис. 3. Миттєві характеристики частотно-регульованих електроприводів системи охолодження

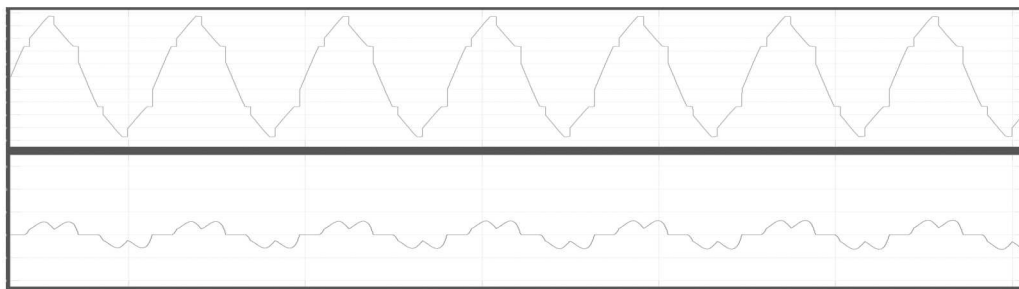


Рис. 4. Осцилограми напруги та струму суднової електромережі без використання пасивного фільтра

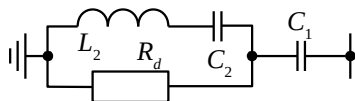


Рис. 5. Принципова електрична схема пасивного фільтра С-типу

Чисельні розрахунки підтверджують зниження сумарного коефіцієнта гармонік по напрузі THD_U до 2,5%. Гармонійний аналіз суднової електромережі показав значне подавлення непарних гармонік при впровадженні розробленого пасивного фільтра С-типу у комп'ютерну модель «Суднова електромережа – си-

стема охолодження дизель-генераторів» на всьому діапазоні моделювання (табл. 1).

Таблиця 1 – Гармонійний вміст напруги та струму

№	Частота, Гц	Напруга, вміст, %		Струм, вміст, %	
		без фільтрів	з фільтрами	без фільтрів	з фільтрами
1	60	100	100	100	100
5	300	4,97	1,53	40,62	4,30
7	420	2,72	1,32	15,86	2,64
11	660	1,92	0,41	7,14	0,52
13	780	1,01	0,19	3,17	0,21

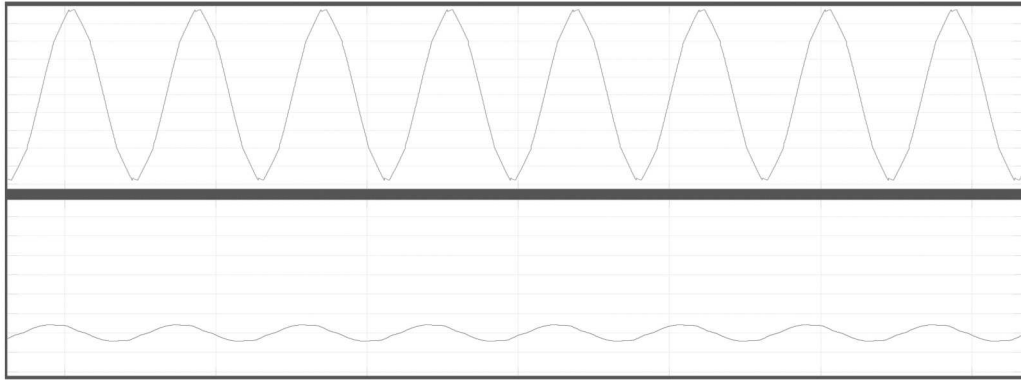


Рис. 6. Осцилограми напруги та струму суднової електромережі з використання пасивного С-фільтра

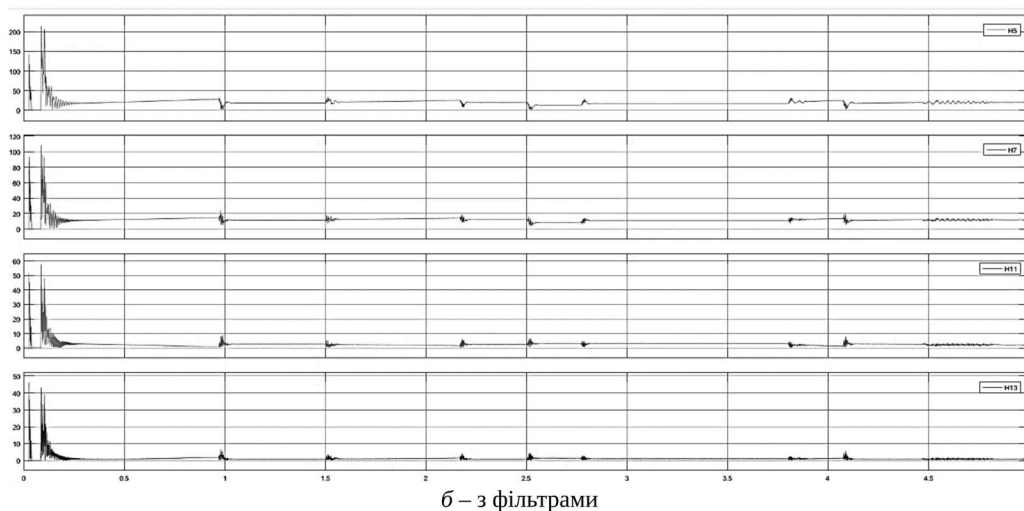
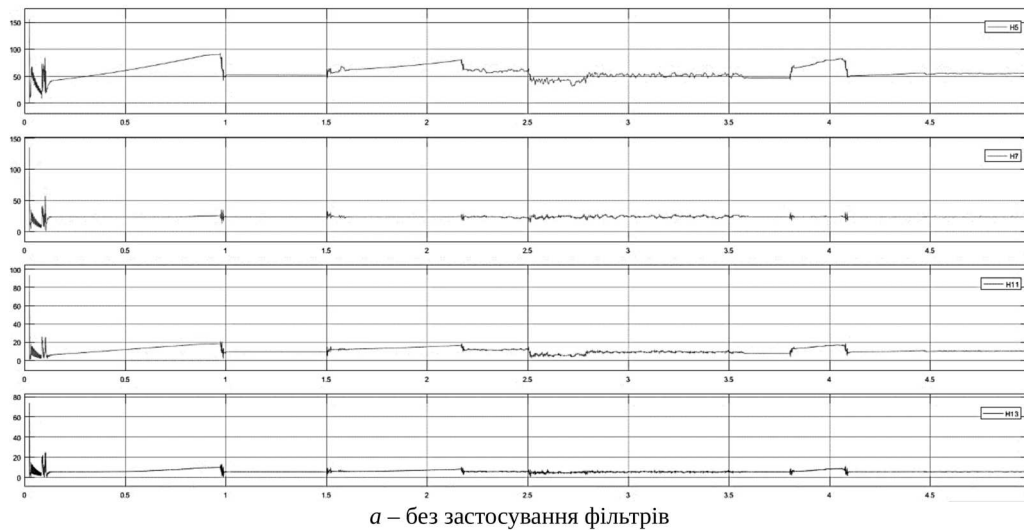


Рис. 7. Наявність гармонік при роботі моделі «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів»

На рис. 7 зображено вміст 5-ї, 7-ї, 11-ї, 13-ї гармонік електромережі при роботі комп'ютерної моделі «Суднова електромережа – система охолодження дизель-генераторів» без застосування фільтрів та з фільтрами на протязі всього періоду моделювання, який включає характерні режими роботи системи охолодження дизель-генераторів. За допомогою вбудованої функції швидкого перетворення Фур'є (FFT Analysis) розраховані сумарні коефіцієнти гармонік за напругою та струмом електромережі (табл. 2, 3). Отри-

мані результати підтверджують доцільність використання пасивної фільтрації у типових режимах роботи системи охолодження дизель-генераторів, яка базується на роботі частотно-регульованих електроприводів за принципом «Master - Slave».

Висновки. Отриманні результати комп'ютерного моделювання показують ефективність використання пасивного фільтра С-типу для підвищення якості суднової електромережі та застосуванні частотно-регульованих електромеханічних систем [7].

Таблиця 2 – Сумарні коефіцієнти гармонік за напругою та струмом при сумісній роботі двох електродвигунів у статичних режимах

THD	Час моделювання, сек.					
	1.0-2.5		2.8-3.8		4.1-5.0	
	без фільтрів	з фільтрами	без фільтрів	з фільтрами	без фільтрів	з фільтрами
THD _U , %	7,46	2,38	6,33	2,02	6,64	2,23
THD _I , %	46,38	8,17	54,51	4,87	48,72	5,82

Завдяки використанню пасивного фільтра С-типу вміст вищих гармонік напруги THD_U зменшується в 3-и рази для 5-ї гармоніки, в 5-ть разів для 11-ї та 13-ї гармонік та 2-а рази для 7-ї гармоніки. Ступінь подавлення гармонік струму THD_I складає в середньому 11 разів для усіх непарних гармонік. Незалежно від режимів роботи частотно-регульованих електроприводів системи охолодження дизель-генераторів сумарний коефіцієнт гармонік з напруги THD_U має тенденцію до зменшення у 3 рази та складає 2,52% на усьому діапазоні моделювання. Сумарний коефіцієнт гармонік струму THD_I також зменшується майже у 5 разів. Отримані показники якості суднової електромережі цілком відповідають вимогам морських Класифікаційних Товариств.

Список літератури

- De Abreu J. P., De Sa J. S., Prado C. C. Harmonic voltage distortion in isolated electric systems. *Proceedings of the 7th International Conference Electrical Power Quality and Utilization*. Krakov, 2003. pp. 469 – 472.
- MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6: справочная монография. В 3 т. Т. 1: Основы применения / В. П. Дьяконов. Москва: СОЛОН-Пресс, 2005. 800 с.
- Гоголюк П. Ф. Теорія автоматичного керування: навчальний посібник. Львів: Львівська політехніка, 2012. 280 с.
- Prousalidis J. M., Styvaktakis E., Hatzilau I. K., Kanellos F., Perrosand S., Sofras E. Electric Power Supply Quality in ship systems: an overview. *International Journal of Ocean Systems Management*. 2008. Vol. 1, № 1. pp. 68 – 83.
- Дранкова А. О., Михайков С. С., Красовський І. І. Методи підвищення якості електроенергії в системі «Автономне джерело - нелінійне навантаження» засобами пасивної фільтрації. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017, Вип. 27 (1249). С. 273 – 277.
- Дранкова А. О., Муха М. Й., Михайков С. С., Красовський І. І. Підвищення якості електроенергії шляхом використання пасивної фільтрації в електромеханічних системах з нелінійним навантаженням. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. Одеса: Астропрінт. 2018, № 27 (103). С. 118 – 124.
- Дранкова А. О., Красовський І. І., Волков В. Е., Горбунов Д. А. Оцінка показників якості електроенергії суднової електромережі з впровадженням системи знезараження баластних вод. *Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика: Матеріали наук.-метод. конф. 05 - 06 грудня 2018*. Одеса: НУ «ОМА», 2018. С. 93 – 99.

Таблиця 3 – Сумарні коефіцієнти гармонік за напругою та струмом за весь період моделювання

THD	без фільтрів	з фільтрами
THD _U , %	7,17	2,52
THD _I , %	52,59	11,37

References (transliterated)

- De Abreu J. P., De Sa J. S., Prado C. C. Harmonic voltage distortion in isolated electric systems. *Proceedings of the 7th International Conference Electrical Power Quality and Utilization*. Krakov, 2003. pp. 469 – 472.
- MATLAB 6.5 SP1/7+Simulink 5/6. V 3 t. T. 1: Основы применения [Basics of application] / V. P. D'yakov. Moskva: SOLON-Press, 2005. 800 p.
- Hoholiuk P. F. *Teoriia avtomatichnoho keruvannia: navchalnyi posibnyk* [The theory of automatic control: teaching manual]. Lviv: Lviv Polytechnic, 2012. 280 p.
- Prousalidis J. M., Styvaktakis E., Hatzilau I. K., Kanellos F., Perrosand S., Sofras E. Electric Power Supply Quality in ship systems: an overview. *International Journal of Ocean Systems Management*. 2008, vol. 1, № 1. pp. 68 – 83.
- Drankova A. O., Mikhaikov S. S., Krasovskiy I. I. Metody pidvyshchennia yakosti elektroenerhii v systemi «Avtonomne dzhherelo - nelineine navantazhennia» zasobamy pasyvnoi filtratsii [Methods of improving the quality of electricity in the system "Autonomous source - nonlinear load" by means of passive filtration]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Kharkiv: NTU «KhPI», 2017, Vyp. 27 (1249). pp. 273 – 277.
- Drankova A. O., Mukha M. Y., Mikhaikov S. S., Krasovskiy I. I. Pidvyshchennia yakosti elektroenerhii shliakhom vykorystannia pasyvnoi filtratsii v elektromekhanichnykh systemakh z nelineinym navantazhenniam [Improvement of electric power quality by using passive filtration in electromechanical systems with nonlinear load]. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy* [Electrotechnic and computer systems]. Odesa: Astroprint. 2018, № 27 (103). pp. 118 – 124.
- Drankova A. O., Krasovskiy I. I., Volkov V. E., Horbunov D. A. Otsinka pokaznykiv yakosti elektroenerhii sudnovoї elektromerezhi z vprovadzhenniam systemy znezarazhennia balastnykh vod. [Estimation of power quality indicators of the ship's electrical grid with introduction of ballast water disinfection system]. *Sudnova elektroinzheneriia, elektronika i avtomatyka: Materialy nauk.-metod. konf. 05 - 06 hrudnia 2018 r., Odesa* [Ship engineering, electronics and automatics: Materials of the scientific-methodical conference 05-06 december 2018]. Odesa: NU «OMA», 2018. pp.93 – 99.

Надійшла 30.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Міхайков Сергій Сергійович (Михайков Сергей Сергеевич, Mikhaykov Sergiy) – компанія «Stolt Tankers LTD», судновий електро-інженер; м. Одеса, Україна; e-mail: pilot.vodolaz@gmail.com

Муха Микола Йосифович (Муха Николай Иосифович, Mykola Mukha) – доктор технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри суднової електромеханіки та електро-техніки; м. Одеса, Україна; e-mail: mykola_mukha@hotmail.com

Дранкова Алла Олегівна (Дранкова Алла Олеговна, Drankova Alla) – кандидат технічних наук, Національний університет «Одеська морська академія», доцент кафедри суднової електромеханіки та електро-техніки; м. Одеса, Україна; e-mail: drankova64@gmail.com

Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

Серія «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика», № 16 (1341) 2019